

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-170758

(43)公開日 平成6年(1994)6月21日

(51)Int.Cl.<sup>5</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

B 2 5 J 5/00

E 8611-3F

C 8611-3F

B 6 2 D 57/032

G 0 5 B 19/18

D 9064-3H

B 6 2 D 57/ 02

E

審査請求 未請求 請求項の数3(全17頁) 最終頁に続く

(21)出願番号

特願平4-136260

(22)出願日

平成4年(1992)4月28日

(71)出願人 000005326

本田技研工業株式会社

東京都港区南青山二丁目1番1号

(72)発明者 小澤 信明

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社  
本田技術研究所内

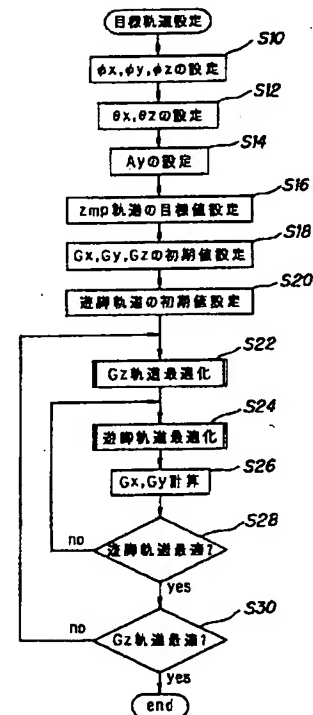
(74)代理人 弁理士 吉田 豊 (外1名)

(54)【発明の名称】 リンク式移動ロボットの制御装置

(57)【要約】

【構成】 姿勢目標値設定手段、アクチュエータの目標操作量決定手段、アクチュエータの駆動手段を備え、荷物を積載して運搬する、または、荷物が回転しない様に運搬するリンク式移動ロボットの制御装置。

【効果】 貨物の重心まわりのイナーシャを予め測定することなく、重心軌道を正確に設定することができ、歩行の安定性の向上を図ることができる。



# 【特許請求の範囲】

【請求項1】 脚（腕）部リンクを有し、該脚（腕）部リンクで自重を支持、又は移動のための駆動力を発生するリンク式移動ロボットの制御装置において、

- a. 前記ロボットの姿勢又は姿勢の時系列に関する目標値を設定する目標値設定手段、
- b. 前記姿勢又は姿勢の時系列に関する姿勢目標値にしたがって、前記ロボットのアクチュエータの目標操作量を決定する目標操作量決定手段、及び
- c. 前記目標操作量となる様にアクチュエータを駆動する駆動手段、のうち、少なくとも1つを備えると共に、貨物を積載して運搬することを特徴とするリンク式移動ロボットの制御装置。

【請求項2】 貨物を積載し、運搬するに際し、該貨物の任意の回転軸まわりの回転角速度が実質的に零または所定の値より小さくなる様に運搬することを特徴とする請求項1項に記載のリンク式移動ロボットの制御装置。

【請求項3】 貨物を積載し、運搬するに際し、該貨物を積載する部位の任意の回転軸まわりの回転運動に係る前記目標値を、該部位の任意の回転軸まわりの回転角速度が実質的に零または所定の値より小さくなる様に設定することを特徴とする請求項1項に記載のリンク式移動ロボットの制御装置。

# 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 この発明はリンク式移動ロボットの制御装置に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 従来、移動ロボットに関する技術としては車輪式、クローラ式、脚式などのロボットが提案されている。その中で、脚式移動ロボットの制御技術に関するものとして、1脚のロボットに関する技術（Raibert, M.H., Brown, Jr. H.B., "Experiments in Balance With a 2D One-Legged Hopping Machine", ASME, J of DSM C, vol. 106, pp. 75-81 (1984)）、2脚のロボットに関する技術（日本ロボット学会誌vol. 1, no. 3, pp. 167-203, 1983）、4脚のロボットに関する技術（日本ロボット学会誌vol. 9, no. 5, pp. 638-643, 1991）、6脚のロボットに関する技術（Fischetti, M.A., "Robot Do the Dirty Work", IEEE, spectrum, vol. 22, no. 4, pp. 65-72 (1985)）、Shin-Min Song, Kenneth J. Waldron, "Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle", The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England）が多数提案されている。更には、比較的低自由度のロボットでリアルタイムに力学的に安定な移動（歩行）パターンを生成する技術（下山, "竹馬型2足歩行ロボットの動的歩行", 日本機械学会論文集 C篇, 第48巻, 第433号, pp. 1445-1454, 1982. および"Legged Robots on Rough Terrain: Experiments in Adjusting Step Length", by Jessica Hodgins, IEEE, 1988）や、比較的多自

由度のロボットでオフラインで安定な移動（歩行）パターンを生成する技術（特開昭62-97006号、特開昭63-150176号）も提案されている。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】 従来、荷物を積載して運搬するロボットとしては、工場のラインなどで既に実用化されている搬送用ロボットなどがあるが、これらのロボットは車輪式であるために平坦な路面上しか移動できない。そのため、段差をなくしたり、スロープを設置したり、ときにはエレベータの設置など、作業環境をロボットのために整備する必要があるという欠点があった。

【0004】 従って、この発明の目的は、上記した従来技術の欠点を解消し、段差や階段を含む環境や、さらには不整地などの環境でも荷物を運搬することができるリンク式移動ロボットの制御装置を提供することにある。

## 【0005】

【課題を解決するための手段】 上記した課題を解決するために、この発明は例えば請求項1項に記載の如く、脚（腕）部リンクを有し、該脚（腕）部リンクで自重を支持、又は移動のための駆動力を発生するリンク式移動ロボットの制御装置において、前記ロボットの姿勢又は姿勢の時系列に関する目標値を設定する目標値設定手段、前記姿勢又は姿勢の時系列に関する姿勢目標値にしたがって前記ロボットのアクチュエータの目標操作量を決定する目標操作量決定手段、及び前記目標操作量となる様にアクチュエータを駆動する駆動手段、のうち、少なくとも1つを備える様に構成すると共に、貨物を積載して運搬する様に構成した。

## 【0006】

【作用】 段差や階段などがあっても移動できるリンク式のロボットによって、荷物の搬送を行うことにより、作業環境をロボットのために整備する必要から解放することが達成できる。従って、環境の整備が困難な既存の設備においても容易にロボットの導入が行えるようになる。

【0007】 さらに、該リンク式ロボットは室内のみならず、屋外や、さらには不整地などを移動することも可能なので、例えば山小屋へ荷物を運搬する場合など、車両では運搬できない山道などの部分は人間が荷物を背負って運搬していたが、この部分を人間に替わって機械で運搬することができる様になるので、人間を重労働から解放することができる。

## 【0008】

【実施例】 以下、脚式移動ロボットとして2足歩行のロボットを例にとってこの発明の実施例を説明する。図1はそのロボット1を全体的に示す説明スケルトン図であり、左右それぞれの脚部リンク2に6個の関節を備える（理解の便宜のために各関節をそれを駆動する電動モータで示す）。該6個の関節は上から順に、腰の脚部回転用の関節10R、10L（右側をR、左側をLとする）。

以下同じ)、腰のロール方向(x軸まわりに回転)の関節12R、12L、同ピッチ方向(y軸まわりに回転)の関節14R、14L、膝部のピッチ方向の関節16R、16L、足首部のピッチ方向の関節18R、18L、同ロール方向の関節20R、20Lとなっており、その下部には足平(足部)22R、22Lが装着されると共に、最上位には筐体(基体)24が設けられ、その内部には制御ユニット26が格納される。筐体24の上面にはルーフキャリア28が設けられ、そこに必要に応じて貨物30を積載することができる。ルーフキャリア28は、図示の如く、筐体24の上面の四隅に対抗的に配設された4個のスライダからなり、各スライダはそれぞれx方向またはy方向に滑動して貨物を挟持した後、その位置にロックすることができ、ロボット1が歩行するとき貨物30が移動、回転しない様な構成となっている。

【0009】上記において腰関節は関節10R(L)、12R(L)、14R(L)から構成され、また足関節は、関節18R(L)、20R(L)から構成される。また、腰関節と膝関節との間は大腿リンク32R、32Lで、膝関節と足関節との間は大腿リンク34R、34Lで連結される。ここで、脚部リンク2は左右の足についてそれぞれ6つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの $6 \times 2 = 12$ 個の関節(軸)をそれぞれ適宜な角度に駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に3次元空間を歩行することができる様に構成される。先に述べた様に、上記した関節は電動モータからなり、さらにはその出力を倍力する減速機などを備えるが、その詳細は先に本出願人が提案した出願(特願平1-324218号、特開平3-184782号)などに述べられており、それ自体はこの発明の要旨とするところではないので、これ以上の説明は省略する。

【0010】図1に示すロボット1において、足首部には公知の6軸力センサ36が設けられ、足平を介してロボットに伝達されるx、y、z方向の力成分 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ とその方向まわりのモーメント成分 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ とを測定し、足部の着地の有無と支持脚に加わる力の大きさと方向とを検出する。また足平22R

(L)の四隅には静電容量型の接地スイッチ38(図1で図示省略)が設けられて、足平の接地の有無を検出する。さらに、筐体24には傾斜センサ40が設置され、x-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度、同様にy-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度を検出する。また各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる。さらに、図1では省略するが、ロボット1の適宜な位置には傾斜センサ40の出力を補正するための原点スイッチ42と、フェール対策用のリミットスイッチ44が設けられる。これらの出力は前記した筐体24内の制御ユニット26に送られる。

【0011】図2は制御ユニット26の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ40などの出力はA/D変換器50でデジタル値に変換され、その出力はバス52を介してRAM54に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力はカウンタ56を介してRAM54内に入力されると共に、接地スイッチ38などの出力は波形整形回路58を経て同様にRAM54内に格納される。制御ユニット内にはCPUからなる第1、第2の演算装置60、62が設けられており、第1の演算装置60は後述の如くROM64に格納されている歩行パターンを読み出して目標関節角度(関節駆動パターン)を算出してRAM54に送出する。また第2の演算装置62は後述の如くRAM54からその目標値と検出された実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な制御値を算出してD/A変換器66とサーボンプを介して各関節を駆動する電動モータに出力する。

【0012】続いて、この制御装置の動作を説明する。

【0013】図3はこの制御装置の動作の中の目標軌道設定手順を示すフロー・チャートである。設定されたデータが図2に示す制御ユニット26のROM64に格納され、それに基づいて今述べた様に、制御ユニット26で関節駆動制御が行われる。

【0014】先ず目標軌道設定手順を説明すると、重心軌道などの位置情報を用いて関節角度を決定してロボットの姿勢を一意に決めるには、その自由度と同数の姿勢決定パラメータを用いる必要がある。即ち、実施例にかかるロボット1の場合、12個の関節を備えて12個の自由度を有することから、12個のパラメータを用いて各関節を変数とする12元1次連立方程式を解いて各関節の関節駆動パターン(目標角度)を決定する。この制御においては、そのため、12個のパラメータとして図4に示す様に、

筐体24の回転角度 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$

遊脚足平22R(L)の回転角度 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$

重心の座標 $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$

遊脚足関節18、20R(L)の交点座標 $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$

を用いる。ここで回転角度は図示の如く、その添字が示す方向まわりの角度を示す。また重心などの3次元座標は、支持脚の足平先端位置を原点とする。

【0015】ここで、この制御を概括すると、これら12個のパラメータを一定値または初期値に仮に固定した上で重心軌道、遊脚軌道などをチェックし、その(加)速度成分のピーク値を修正して関節トルクが低減する様に、パラメータとそれから決定される関節駆動パターンとを補正する様にした。また、いわゆるzmpの概念を導入して重心軌道を設定することも特徴とする。ここで、zmp(zero moment point)とは周知の如く、足裏をある1点で地面に固定したと考えたとき、歩行動作

によってその点にモーメントが発生しない様な点を意味する。即ち、図5に示す如く、ロボットに働く外力は重力 $mg$ と路面反力 $F$ である。即ち、重心 $G$ には重力による鉛直方向の力が加わると共に、重心が加速度を受けることによって生ずる慣性力 $-mG$ ツォ・ドットも働き、その2つの力の合力と地面から受ける路面反力 $F$ 、さらには、各リンクの慣性モーメントと角加速度によって発生するモーメントの総和 $M = \sum (I_i \cdot \ddot{\theta}_i \text{ツォ・ドット})$ とが釣り合っロボットは歩行する。この路面反力 $F$ を集中荷重としたときの作用点が $z_{mp}$ である。この $z_{mp}$ がロボット全体の接地点の外周を結んだ安定領域（支持多角形）の外に出ると、ロボットは転倒する。従って、この制御においては $z_{mp}$ が所定の領域に位置するように、歩容パラメータを設定する。別言すれば、ロボットが路面その他の環境と接触している部分を頂点として構成される多面体又は多角形と、環境からロボットに

$$\frac{d}{dt} \sum (I_i \cdot \dot{\omega}_i + m_i \cdot g_{xi} \cdot \dot{g}_{zi} + m_i \cdot g_{zi} \cdot \dot{g}_{xi}) = \sum (M_j)$$

ただし、 $i$  : リンクの番号

【0019】ここで、ロボット1のある瞬間における $z_{mp}$ に関して角運動量の法則を適用すると、ロボット1に作用する外力は重力と路面反力であるが、路面反力は $z_{mp}$ を通るので、外力のモーメントは重力によるものだけとなる。従って、数1に $z_{mp}$ の座標を加えて変形

$$\frac{d}{dt} \sum \{ I_i \cdot \dot{\omega}_i + m_i (g_{xi} - Z_x) \cdot \dot{g}_{zi} + m_i (g_{zi} - Z_z) \cdot \dot{g}_{xi} \} \\ = M \cdot g \cdot (G_x - Z_x)$$

【0021】ロボット1が安定に歩行するためには、この $z_{mp}$ が安定領域内にあることが必要条件であり、ロボット1の歩容は、この条件式を満足する様に決定されなければならない。しかし、数2にはロボット1を構成する各部材の質量、重心位置、イナーシャなどが含まれているために、これらのパラメータをロボット1が歩行する以前に求めておかなければならない。さらに、ロボット1に貨物30を積載して歩行させる場合、安定条件式には、貨物の質量、その重心位置、貨物の重心まわりのイナーシャも含まれる。このうち質量、重心位置については前記した6軸力センサ36を通じて容易に検出することができるが、貨物の重心まわりのイナーシャに関しては動的な測定が必要となることから、測定困難である。そこで、この制御においては、貨物を実質的に回転させない歩容でロボット1を歩行させることとした。その結果、貨物相当リンクについての $I\omega$ の項を無視することができ、貨物の重心まわりのイナーシャを予め知る（測定する）必要がなく、単にその質量と重心位置のみを測定すれば良いことになって演算が簡略となる。さら

作用する全ての外力の合力ベクトルとの交点の集合が $z_{mp}$ である。

【0016】以下、図3フロー・チャートを参照して説明すると、先ずS10において筐体24の回転角度 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$ を設定する。この場合には常に零と設定した。以下、その理由を述べる。

【0017】質点系については角運動量の法則、即ち、質点系のある固定点に関する角運動量の時間的変化の割合は、外力のその点に関するモーメントの和に等しく、従って外力の作用しない質点系の角運動量は不変である、なる法則が妥当するが、図6に示す様にロボット1の $x-z$ 平面についてこれを示すと、数1に示す様になる。

【0018】

【数1】

した数2を解くことによって $z_{mp}$ の位置を求めることができる。

【0020】

【数2】

には、貨物を回転させないこととした結果、荷くずれや貨物の落下、それに伴う貨物の破損などを未然に防止することができるなどの副次的な効果も生じる。尚、回転角度 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$ を零とするとしたが、 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$ は、特に零である必要はなく、その微分値である角速度 $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ が実質的に無視できる程度の大きさであれば、 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$ はどのような値でもよい。

【0022】図3フロー・チャートにおいては続いてS12に進み、遊脚足平の回転角度 $\theta_x$ ,  $\theta_z$ を設定する。ここでは $\theta_x$ ,  $\theta_z$ を共に零に設定した。続いてS14に進み、遊脚足関節の座標のうちの $A_y$ を設定する。図1に示したロボットにおいて、両脚部リンク2の足関節の歩隔（即ち、足関節の $y$ 方向の離間距離）を200mmに設定したことから、ここでは $A_y$ を200mmに設定する。

【0023】続いてS16に進んで $z_{mp}$ 軌道の目標値を設定する。先にも述べた様に、ロボットが安定に歩行するためには、片脚支持期に $z_{mp}$ はロボット全体の接

地点の外周を結んだ安定領域内部に、即ち、支持脚の足裏内に位置しなければならない。人間の歩行も同様にこの条件を満足している。そのときの  $zmp$  の位置に注目してみると、 $zmp$  は離床の瞬間に次の片脚支持期の安定領域の後端にあり、片脚支持期間に安定領域内を移動して着地の瞬間には前記の安定領域の前端にある。人間の歩行は着地位置や着地のタイミングを絶妙に調整するなどの方法で歩行の安定化を図っており、非常に高い安定性を有している。それ故この様な  $zmp$  軌道が合理的であると推測され、実際に重心の加減速が小さく、また関節にかかる負荷も小さいことが確かめられた。一方、運動性能が人間よりも劣る、特に安定性が人間に比較して低いと言わざるを得ない現状のロボットでは、 $zmp$  を人間と同じ様にすると、離床の直後と着地の直前とで  $zmp$  が安定領域の端にあったのでは、十分に安定な歩行を実現することができない。しかし、ロボットには図1に示した様に足平の面積を比較的大きくすることができる、また関節トルクを大きくすることができる、など人間にはない特徴があり、これらを活用して  $zmp$  軌道の目標値を設定することにより、歩行の安定性を向上させることができる。

【0024】以上から、この制御においては、 $zmp$  が図7、図8に示す位置にある様に  $zmp$  軌道の目標値を設定した。即ち、

1. 離床の瞬間の  $zmp$  が、直後の片脚支持期の安定領域内にいること。
2. 離床の瞬間の  $zmp$  が、直後の片脚支持期の安定領域内にあり、かつその後端と左右端に対して少なくとも所定の余裕を持つこと。
3. 着地の瞬間の  $zmp$  が、直前の片脚支持期の安定領域内にいること。
4. 着地の瞬間の  $zmp$  が、直前の片脚支持期の安定領域内にあり、かつその前端と左右端に対して少なくとも所定の余裕を持つこと。
5. 片脚支持期の  $zmp$  が、安定領域に対して少なくとも所定の余裕を持つこと。

尚、言うまでもなく、上記で前（後）端は  $x$  軸方向の、左右端は  $y$  軸方向の位置を示す。

【0025】即ち、歩行中、種々の外乱などによってロボットが倒れそうになると、 $zmp$  は目標位置から外れて移動し、安定領域の境界まで達するとロボットは倒れ始める。しかしながら、上記の如く構成したことにより、離床と着地の瞬間を含む片脚支持期の全ての瞬間において、 $zmp$  の位置は安定領域の端に対して少なくとも所定の余裕を持つので、 $zmp$  を安定領域の端まで移動させるほどの大きい外乱が加わらなければ、ロボットは傾かない。従って、この余裕が大きいほど安定であると言える。このとき、各関節は、外力によって生じる負荷に抗して姿勢を保持するために、能動的にトルクを発生している。また、姿勢の安定を回復する方向に  $zmp$

を移動させる様に、積極的に関節トルクを発生すれば、ロボットに作用する安定性回復力の力積を大きくすることができるので、さらに安定な歩行を実現することができる。このときの  $zmp$  の移動量が大きいほど安定性の回復能力が大きいと言う関係が成立するが、 $zmp$  は安定領域の外側に出られないので、外乱などが無い状態における  $zmp$  を安定領域の十分内側に位置させることが、安定性を高める要因となる。上記の如く、この制御においては、足平面積が大きい、関節トルクが大きいと言う特徴を生かして歩行の安定性を高める様にした。S16で設定する  $zmp$  の軌跡の目標値を歩行中に上方から見ると、平面的に示すと、図9に示す様になる。尚、この明細書では「軌道」は時間に依存した表現を、「軌跡」は時間に依存しない表現を、意味するものとして使用する。

【0026】続いてS18に進んで重心の位置  $Gx$ 、 $Gy$ 、 $Gz$  の初期値を設定する。これについては後で重心軌道の最適化を図ることから、ここでは単に歩行する姿勢がとれば良いと言う程度の値に設定する。続いてS20に進んで遊脚軌道の初期値を設定する。即ち、遊脚について未だ設定されていない足関節の座標  $Ax$ 、 $Az$  と足平の回転角度  $\theta y$  について、とりあえずは遊脚が地面に接触しない程度の値に設定する。続いてS22に進み、重心軌道のうちの上下（重力）方向成分  $Gz$  について最適化を図る。

【0027】これについて説明すると、歩行の1周期（右（左）脚支持期から両足支持期を経て左（右）脚支持期に至る期間）について重心の位置  $Gz$  の上下方向の変化を見ると、図10に示す様になる（尚、重心位置の変化は微小であり、また実際に得られる波形はもっと複雑であるが、ここでは理解の便宜のため、変化を誇張すると共に、波形も滑らかに示す）。また、重心位置が変位する速度（ $Gz$  ドットで示す）、重心位置が変位する加速度（ $Gz$  ツー・ドットで示す）も併せて同図に示す。

【0028】ここでロボットにかかる負荷を図11に示す様に例えば膝関節16R（L）について見ると、外力の負荷＝路面反力  $F \times$  距離  $L$

路面反力  $F = mg + mGz$  ツー・ドット

負荷の合計＝外力の負荷（保持トルク）＋内力の負荷（加減速トルク）

と示すことができる（上下方向についてのみ示す）。即ち、ロボットの重心の加速度が大きいとロボットに働く外力もそれに応じて大きくなる。それによって、ロボットはそれに耐えるだけの強度と剛性、アクチュエータの出力を必要として部材重量の増加、駆動系の重量増加となって総重量の増加を強いられ、結果としてロボットに作用する外力がさらに増大すると言った悪循環が生まれる。また、消費エネルギーも必要以上に大きくなるために、ロボットの作業時間が短縮されると共に、エネルギー

源も大型になり、悪循環に拍車をかける。この悪循環を断ち切ってロボットの軽量化を図るためには、外力をできるだけ小さく抑えた重心軌道の運動パターンで歩行させることが重要である。さらに、関節の保持トルクはその角度を一定として考えれば外力に比例しているので、外力が大きいつきは保持トルクも大きくなる。特に、支持脚の膝関節の保持トルクは曲げ角度にも強く影響を受け、曲げ角度が大きくなると、前記した距離 $L$ が大きくなって保持トルクも増加する。また、加減速トルクは関節の角加速度に比例する。さらに、加速度の変化が大きいと言うことは、運動パターンとして無駄が多くて滑らかさに欠けており、歩行安定性の上からも望ましくない。

【0029】従って、膝関節にかかる負荷を低減するためには、重心の加速度を小さく抑え、ロボットに作用する外力（路面反力）を低減すること、ならびに重心の高さを可能な限り高くして支持脚膝関節の曲げ角度（前記した距離 $L$ に比例）を大きくしないことが重要となる。そこで、この制御においては重心の上下方向の運動パターンを最適に設定し、歩行中にロボットに作用する外力の低減化、関節負荷の低減化、消費エネルギーの低減化を図ると共に、歩行安定性を向上させ歩容を人間のそれに一層近づけて人間の作業動作環境への適応を容易にするようにした。

【0030】以下、図12のサブルーチン・フロー・チャートを参照して重心の鉛直方向軌道の最適化を説明する。まず図12のS100では図3のフロー・チャートのS18で初期設定された、又はS22でこれから述べる様に修正されることになる重心の鉛直方向軌道を初期値として、図3のフロー・チャートのS10、S12、S14、S16、S18、S20で設定された他の歩容パラメータ、又は後で述べる様にS24、S26で修正されることになる遊脚軌道、重心の前後、左右方向の軌道を前提とした時に取れる姿勢のなかで最も高い重心の鉛直方向軌道を探索して、重心の鉛直方向限界軌道（ $Gz_{lim}$ 軌道）とする。ここで得られた重心の鉛直方向限界軌道（ $Gz_{lim}$ 軌道）を図10の上段のグラフに一点鎖線で示した。この重心の鉛直方向限界軌道（ $Gz_{lim}$ 軌道）では少なくとも左右どちらかの膝関節16R

(L)が伸び切った姿勢となっている。重心の鉛直方向限界軌道（ $Gz_{lim}$ 軌道）を重心の鉛直方向軌道（ $Gz$ 軌道）としてS102に進む。S102では重心の鉛直方向軌道（ $Gz$ 軌道）の最小値 $Gz_{min}$ を探索する。

【0031】続いてS104では鉛直方向の重心加速度のリミット処理を行う。S102で探索した $Gz_{min}$ となる時刻から時間の進む方向と戻る方向の両方向に向けて鉛直方向の重心加速度（図10の下段のグラフに一点鎖線で表す）のチェックを行い、もしある時刻における鉛直方向の重心加速度の絶対値が所定の鉛直方向の重心加速度の最大値（ $Gz_{ツール・ドット・max}$ ）を超えていた

場合には、その時刻における鉛直方向の重心加速度が所定の鉛直方向の重心加速度の最大値（ $Gz_{ツール・ドット・max}$ ）になるように、かつ重心の鉛直方向限界軌道（ $Gz_{lim}$ 軌道）を超えないように鉛直方向の重心軌道（ $Gz$ 軌道）に修正を加える。かように修正された $Gz_{lim}$ 軌道の $Gz_{ツール・ドット}$ 軌道を図10の下段のグラフに実線で示す。また、同様に鉛直方向の重心速度（ $Gz_{ドット}$ ）のリミット処理を行ってもよい。これで全ての時刻における鉛直方向の重心加速度（速度）が所定の範囲内（ $-Gz_{ツール・ドット・max} \sim Gz_{ツール・ドット・max}$ 、 $-Gz_{ドット・max} \sim Gz_{ドット・max}$ ）にあるという条件を満足する軌道のなかでその平均高さが最も高い鉛直方向の重心軌道が実現される。実施例では所定の鉛直方向の重心加速度の最大値（ $Gz_{ツール・ドット・max}$ ）を $0.2g \sim 0.7g$ （ $g$ ：重力加速度）と設定した場合に良好な結果が得られた。

【0032】図12サブルーチン・フロー・チャートにおいては続いてS106に進んで、図10の上段のグラフに示す様に、 $Gz$ 軌道の最小値 $Gz_{min}$ に対して所定の余裕 $Gz_{margin}$ を持たせる様に、下方に平行移動させる（よって求められる値を図10の上段のグラフに「 $Gz$ 軌道（最終値）」で示す）。即ち、例えば図13と図14に示す様に、膝関節が比較的大きく曲がった状態（図13）と膝関節が大きく伸びた状態（図14）とでは図15に示す様に、膝関節角度の変化分 $\Delta\theta_{1,2}$ と重心位置の上下方向変化分 $\Delta z$ との割合が大きく相違する。即ち、図14の様に重心の高さが限界高さに近づくと、支持脚膝関節が伸び切った状態に近づくために重心高さに対する支持脚膝関節の感度（ $\Delta\theta_2 / \Delta z$ ）が図13の場合のそれ（ $\Delta\theta_1 / \Delta z$ ）に比較して大きくなり、任意の時間内で重心高さ $Gz$ を $\Delta z$ だけ変化させるために必要な支持脚膝関節の加減速トルクが増大して膝関節にかかる負荷が全体として増加するからである。この理由から所定の余裕を持たせると共に、実施例ではその余裕 $Gz_{margin}$ を10mmとした。尚、この結果、前記した曲げ角度（距離 $L$ に比例）は大きくなり、保持トルクは増加するが、それ以上に加減速トルクが減少するので膝関節にかかる負荷の合計は減少することになる。

【0033】図3フロー・チャートに戻ると、続いてS24に進んで遊脚軌道の最適化を行う。これは膝関節と足関節とについて今述べた $Gz$ 軌道の最適化と同様な処理を行って関節駆動アクチュエータの負荷を軽減し、小型軽量化を図るものである。即ち、先に述べた様に、ロボットの歩容を一意に決定するためには、その自由度と同数のパラメータを必要とすることになるから、遊脚の位置と方向などを指定するためには、少なくとも6個のパラメータを使用することになる。このとき、脚先端の位置と方向とを単に指定しておき、それから各関節の駆動パターンを決定するのみとすると、駆動パターンは歩



容決定パラメータに従属に決定されてしまい、場合によっては関節駆動パターンの角加速度、角速度、動作角度が必要以上に大きくなることもあり得る。その結果、関節を駆動するアクチュエータは必要以上の出力を要求されて大型になり、高速で運動する脚部リンクやロボット全体の重量も増加してGz軌道の最適化で述べたと同様の不都合が生じ得る。また、歩行中はzmpが安定領域内になければならないと言う条件を満足する必要があるが、そのために遊脚の運動に不必要な加速度のピークを持たせてしまった場合、この運動が重心の運動にも反映されて重心の運動まで不要なピークを持ったものとなったり、z軸まわりの回転モーメントを発生したりして歩行を不安定にする。そこで、この制御において関節の駆動パターンの角加速度、角速度のピーク値を抑制することとした。

【0034】図16サブルーチン・フロー・チャートを参照してこの遊脚軌道の最適化について説明すると、まずS200において足関節18R(L)の角加速度、角速度の許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{lim}$ と膝関節16R(L)の角加速度、角速度の許容最大値 $\theta k_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ 、 $\theta k_{\text{ドット}} \cdot \text{lim}$ を設定する。次に、S202において設定されている歩容パラメータから図1に示した12個の関節について各関節の駆動パターンを計算する。続いて、S204に進んで計算された関節駆動パターンのうち、足関節18R(L)の角加速度 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ 、角速度 $\theta a_{\text{ドット}}$ を計算し、それぞれの最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ を探索する。続いて、S206に進んで膝関節についても足関節と同様に角加速度、角速度の最大値 $\theta k_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta k_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ を探索する。次にS208に進んで足関節18R(L)の角加速度、角速度の最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ がS200であらかじめ適切に設定されているそれぞれの許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{lim}$ を超えているかどうか判定する。

【0035】もし、足関節18R(L)の角加速度、角速度の最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ が許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ を超えている場合は、S210に進み $\theta y$ を修正する。これは、 $\theta y$ と足関節の駆動パターンに直接的な関係があり、 $\theta y$ を修正することにより足関節の駆動パターンの角加速度、角速度を許容範囲内に収めることができるからである。以下、図17に沿ってその手順を説明する。図17の左半分は歩容パラメータの内の $\theta y$ の軌道を、右半分は歩容パラメータから計算された足関節の駆動パターンを表しており、上段は角度を、中段は角速度を、下段は角加速度を表している。それぞれのグラフで実線はS210で修正される前の軌道を、一点鎖線は修正された後の軌道を表している（但し、 $\theta y$ 、 $\theta y_{\text{ドット}}$ 、及び $\theta a$ のグラフにおいては実線と一点鎖線はほぼ重なり合っている）。

り合っている）。

【0036】実施例では初めに左側 $\theta y$ のグラフに実線で示した軌道を初期値として図3のS20で与えた。 $\theta y$ の角速度 $\theta y_{\text{ドット}}$ 、角加速度 $\theta y_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ もそれぞれのグラフに実線で示した。他の歩容パラメータも図3のS10、S12、S14、S16、18で与えられている。これらの歩容パラメータに対して、計算された足関節の駆動パターンを右側 $\theta a$ のグラフに実線で示した。とくに中段の角速度（ $\theta a_{\text{ドット}}$ ）、下段の角加速度（ $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ ）のグラフに示したようにそれぞれ角速度、角加速度の最大ピーク値が大きく、また角加速度ではその変化も激しい。そこで、足関節駆動パターンの角加速度 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ のグラフに破線で示した許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ を設け、任意の時刻における角加速度 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ と比較を行ない、後者が前者よりも大きいときは、それを越えた割合に応じて同じ時刻における $\theta y$ の角加速度を修正する。例えば、ある時刻における足関節駆動パターンの角加速度 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ と足関節駆動パターンの角加速度の許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ の比が $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} / \theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim} = 1.2$ であったとすれば、同時刻における $\theta y$ の角加速度 $\theta y_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ を（ $1 / 1.2$ ）倍に修正する。この修正を足関節駆動パターンの角加速度 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ が足関節駆動パターンの角加速度の許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ よりも大きい全ての時刻に対して行なうと、 $\theta y$ の角加速度は $\theta y_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ のグラフ中の一点鎖線で示すように修正される。これを2回、積分して歩容パラメータ $\theta y$ の新しい軌道とする。 $\theta y$ と $\theta y_{\text{ドット}}$ は $\theta y_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ が積分したものとなるので、 $\theta y_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット}$ が修正されたことによる変化はグラフ中では明確になっていない。この新しく修正された歩容パラメータ $\theta y$ から計算された足関節駆動パターンをグラフ中に一点鎖線で示した。 $\theta y$ と同様の理由で足関節の駆動パターン $\theta a$ でみるとほとんど変化がないように見えるが、足関節駆動パターンの角速度で見ればその最大ピーク値が小さくなっていること、角加速度で見れば最大ピーク値が小さくなると共にその変化が少なくなっていることが認められ、S208での $\theta y$ 修正の効果が出ていることがわかる。

【0037】以上は角加速度に対する修正について説明したが、角速度についても同様な処理を行なってもよい。これでS210の $\theta y$ の修正処理は終了し、S202へ戻る。S202に戻る理由についてはS220からS202へと戻る理由と併せて後記する。

【0038】また、足関節18R(L)の角加速度、角速度の最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ が許容最大値 $\theta a_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{lim}$ 、 $\theta a_{\text{ドット}} \cdot \text{lim}$ を超えていない場合にはS212に進む。S212では、S204で計算した膝関節の角加速度、角速度の最大値 $\theta k_{\text{ツ}} \cdot \text{ドット} \cdot \text{max}$ 、 $\theta k_{\text{ドット}} \cdot \text{max}$ とあらかじめ適切

に設定されているそれぞれの許容最大値  $\theta k$  ツー・ドット・lim、 $\theta k$  ドット・lim の比較を行ない、前者が後者よりも大きくないときは遊脚軌道は最適であると判断され、遊脚軌道の最適化処理は終了し図3のS26へと続く。もし、前者が後者よりも大きいときはS214へ進み、以降の処理を受ける。

【0039】S214では膝関節の駆動パターンを改善する過程で必要になる遊脚腰関節の位置を算出する。S216では、S202算出された膝関節の駆動パターンに角加速度、角速度のリミットをかける処理を行なう。以下、図18に沿ってその手順を説明する。図18の上段は遊脚期の膝関節駆動パターンを、中段はその微分値である角速度パターンを、下段は二階微分値である角加速度パターンを示している。これらの図中ではS202で算出された膝関節の駆動パターンに関するものを実線で表示している。下段のグラフの破線はS200で設定された  $\theta k$  ツー・ドット・lim を示している。角加速度のグラフでみると、S202で算出された膝関節の角加速度パターンでは一部、許容最大値の  $\theta k$  ツー・ドット・lim を超えている。S216ではこの部分の角加速度にリミットをかけて最大角加速度  $\theta k$  ツー・ドット・max が最大許容角加速度  $\theta k$  ツー・ドット・lim を超えないように膝関節駆動パターンの角加速度パターンを修正する。S218ではS216で修正された角加速度パターンを積分して角速度パターンを、さらにもう一度積分して膝関節の駆動角度パターンを算出する。修正された膝関節駆動角度パターン、角速度パターン、角加速度パターンを図中に一点鎖線で示した。次に、S220に進みS214とS218で算出された遊脚腰関節12R(L)位置と膝関節駆動角度パターンから図19に示したように、遊脚腰関節と遊脚足関節を結ぶ直線の角度が変化しないように歩容パラメータである遊脚足関節18、20R(L)の交点の座標(Ax, Ay, Az)の軌道を修正し、S202へ戻る。

【0040】ここで、S210とS220からS202へと戻る理由について記す。S210では足関節の駆動パターンの改善を  $\theta y$  軌道を修正することにより、またS220では膝関節の駆動パターンの改善を遊脚足関節18、20R(L)の交点座標軌道(Ax, Ay, Az)を修正することにより試みたが、足関節の駆動パターンは  $\theta y$  に単独に依存しているわけではなく、また膝関節の駆動パターンは遊脚足関節軌道のみには依存しているわけでもないので、 $\theta y$  軌道や遊脚足関節軌道を一度修正するだけでは足関節駆動パターンや膝関節駆動パターンが十分に改善されない場合がある。さらに、 $\theta y$  を修正した影響は膝関節の駆動パターンにも、また遊脚足関節軌道を修正した影響は足関節軌道パターンにも及ぶので一旦、S208又はS212のどちらかの判定条件を満足したとしても、他方の条件を満足させるために行なった修正によって一旦は満足したほうの条件に再び適

合しなくなる場合がないとはいえないからである。そのためにS202に戻り、S208、S212の判定条件を満足するまでループをまわり歩容パラメータの修正を行なう必要があるのである。

【0041】以上述べた遊脚軌道の最適化処理についてまとめると、即ち、初期設定された遊脚軌道から得られる足(膝)関節の角加速度は実際には図17、図18に示す様に無駄が多いものであるが、かかる処理を繰り返すことにより遊脚期間中の足関節及び膝関節の負荷を必要最小限度になる様に適正に修正することができる。また、先に述べた様に、関節駆動パターンを歩容を決定するための遊脚足関節の位置、遊脚足平の回転角度や他の変数に従属させて決定すると、その角加速度、角速度のピーク値が大きくなる場合が生じ得ることから、この制御においては関節の駆動パターンを主変数として取り上げ、遊脚足関節の位置、遊脚足平の回転角度を従属変数とし、関節の駆動パターンを陽に設定する如くした。以上から、関節を駆動するアクチュエータの負荷を軽減することができ、小型軽量化を実現することができる。また、無駄な動作はなくなるので、不必要なエネルギー消費も避けることができる。さらに、ロボット全体の運動が滑らかになるので、脚部リンクを振ることによって発生する反力も最小限となり、安定性に優れ、人間の作業動作環境への適応性が高い歩行を実現することができる。

【0042】図16のS210とS220の両方の判定条件を満足したときには遊脚軌道の最適化処理ルーチンから抜け出して図3のS26へと続く。図3のS26では姿勢決定パラメータである重心の前後、左右方向の軌道(Gx, Gy)を算出する。即ち、Gx, Gy軌道はいくまでの手順において設定された他の姿勢決定パラメータの軌道とS16で設定されたzmp軌道を満足するように算出される。

【0043】図3フロー・チャートにおいては続いてS28で遊脚軌道が最適条件(図16のS208、S212と同じ)を満足しているかどうかチェックする。このチェックが必要な理由について述べると、S24で最適化された遊脚軌道(Ax, Ay, Az,  $\theta x$ ,  $\theta y$ ,  $\theta z$ )はその時点において設定されていたほかの姿勢決定パラメータの軌道を前提条件としていたが、その内のGx, Gy軌道がS26において修正されたために遊脚軌道の最適条件を満足しなくなることがあるからである。もし、この最適条件を満足していない場合はS24に戻り再び遊脚軌道の最適化を行なう。しかしここで、Gx, Gy軌道を修正しても、それが遊脚軌道の最適性、即ちここでは足関節および膝関節の駆動パターン、に与える影響は小さいので、S24→S26→S28→S24を巡るループは数回のうちに収束する。S28の判定条件を満足したならばS30に進む。

【0044】S30ではS28で遊脚軌道の最適性をチェックしたことと同様の理由からS22で最適化した際



の条件、より具体的には、S106で与えたはずの所定の余裕 $Gz\_margin$ が確保されているかどうかのチェックを行なう。S22では最適化の条件として、他にも最大加速度、最大速度の制約も与えたが、 $Gz$ 軌道は姿勢決定パラメータとなっているためこれらの条件に変化はないからである。所定の余裕 $Gz\_margin$ が確保されているかどうかのチェックを行なう必要がある理由は、S22で最適化された $Gz$ 軌道はその時点において設定されていた姿勢決定パラメータの軌道を前提条件として探索された $Gz\_lim$ 軌道に対して $Gz\_margin$ が与えられていたが、S22からS30にいたる過程で遊脚軌道、並びに $Gx$ 、 $Gy$ 軌道に修正が加えられ前提条件が変わり、それに伴って $Gz\_lim$ 軌道も変化している場合が考えられるためである。この条件が満足されていない場合にはS22へと戻って、再び $Gz$ 軌道の最適化を行なう。この、S24→S26→S28→S24のループを含むS22・・・S30→S22を巡るループもS24→S26→S28→S24のループでの修正が $Gz\_lim$ 軌道に与える影響は小さいので数回のうちに収束する。これで歩容、即ち、姿勢決定パラメータの軌道全ての設定が終了する。

【0045】上記の如くして重心軌道、遊脚軌道を含むロボットの全ての目標姿勢が時系列に決定される。

【0046】続いて、図20フロー・チャートを参照して歩行時の制御について説明する。まずS300でインシャライズした後、S302で歩行終了ではないことを確認してS304に進み、そこでタイマ割り込みを待つて時刻 $t=n$ とする。続いてS306に進んで図3フロー・チャートに示した手順で設定された目標軌道を読み出し、S308に進んで時刻 $t$ における関節駆動パターンに変換し、S310に進んで各関節がその駆動パターンになる様にモータの指令値を決定し、S312で時刻をタイマ割り込み間隔に等しい $\Delta t$ だけ更新し、S302を経てS304に戻って更新時刻のタイマ割り込みを待機する。そして、割り込みがあったときは更新時刻について同様の処理を行い、以下、S302で歩行終了と判断されない限り継続し、S302で歩行終了と判断されるときはS314に進んで必要な後処理をして終わる。

【0047】この実施例は上記の如く、予め設定する歩行パターンを関節角度ではなく、重心軌道、遊脚軌道などのロボットの姿勢で設定したので、脚式移動ロボットの目標歩容を正確に表現することができる。さらに、重心軌道については重心位置を大きく変えることなく、その重力方向の加速度の最大値を $0.2g \sim 0.7g$ 以下に抑制し、あるいはその重力方向の加速度の最大値をその実効値の110%以下に抑制し、遊脚軌道についても足関節と膝関節の角加速度をそれぞれ適宜設定する許容値以下となる様に抑制したので、関節にかかる負荷を効果的に低減して関節駆動系の小型軽量化、消費エネルギー

の低減化を図ることができる。さらに、これらの軌道が滑らかで無駄のないものとなって関節の加減速トルクも低減できて関節にかかる負荷をその意味からも低減することができると共に、歩行安定性も増して人間の作業動作環境への適応性を向上させることができる。

【0048】また $zmp$ の概念を導入して $zmp$ が所定の軌跡を辿る様に重心軌道を設定する様にしたことから、常に安定した歩行を確保することができる。また貨物を積載して歩行するときも、貨物を回転させない歩容に設定して $zmp$ が所定の軌跡を辿る様に重心軌道を設定する様にしたことから、貨物を積載するときも常に安定した歩行を実現することができ、さらには貨物を落下させるなどの不都合を生じることがない。

【0049】尚、上記において基体の上面に貨物を積載する様にしたが、それに限られるものではなく、脚部リンクなどに積載個所を設けても良い。要は、貨物積載部位リンク系のイナーシャを無視できる様にすれば良い。また $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸まわりの回転角速度 $\omega x$ 、 $\omega y$ 、 $\omega z$ を全て零または実質的に無視できる程度の大きさとしたが、それに限られるものではなく、任意の1軸または2軸まわりの回転角速度のみを零または実質的に無視できる程度の大きさとして、歩容設計の自由度を考慮しつつ、貨物のイナーシャの測定作業、及び演算量を低減させても良い。また回転角度を用いたが、回転角速度、角加速度を用いても良い。

【0050】尚、上記においては $zmp$ を用いたが、ロボットの移動速度が低速度のときは動的な成分であるロボットの重心に働く慣性力、及び各リンクのイナーシャと角加速度により発生する慣性力を無視しても実質的に安定性が低下することは無いので、 $zmp$ に代えて、これと実質的に等価であるところのロボットの接地面への重心の投影点を用いても良い。また、ロボットの全質量に対する脚部リンクの質量の割合が非常に小さいとき、あるいは脚部リンクのイナーシャが非常に小さいときは、同様の理由により、 $zmp$ に代えて、ロボットの重心に作用する重力と慣性力のみ合力と接地面との交点を用いても良い。

【0051】尚、上記の遊脚軌道の最適化においては、膝関節及び足関節の関節角速度、角加速度の絶対値の最大値が所定値を超えない様に構成したが、それに限られるものではなく、各関節角度の動作範囲の最大値が所定値を超えない様に構成しても良く、また各関節に作用する負荷を直接検出し、その絶対値の最大値が所定値を超えない様にしても良い。さらにこれらにおいて、実効値を参照する様に構成しても良く、あるいは絶対値の最大値または実効値が減少する様に構成しても良い。また、この遊脚軌道の最適化の手法は、遊脚だけでなく支持脚にも妥当するものである。

【0052】尚、上記において重心の位置を用いてきたが、重心位置に代えてこれと実質的に置換可能な部位の

位置、例えば腰の位置（左右の腰関節の中点）を用いても良い。即ち、図4で示したロボット1の場合には、歩行中に取られる全ての姿勢において重心位置が大きく変化することはなく、およそ腰の位置にあるので、腰の位置を用いることによっても本制御の目的を達成し得るからである。この様に、力学的な計算が必要となる重心位置に代え単に幾何学的な計算のみにより求めることのできる腰の位置を用いることにより、演算量を低減することが可能となる。

【0053】尚、上記において脚式移動ロボットの脚部リンクについて説明してきたが、この発明は腕部リンクについても妥当するものであり、例えばリンク式ロボットが脚部リンクで路面を歩行しつつ腕部リンクで壁に寄り掛かりながら移動する場合や、脚部リンクと共に腕部リンクをも路面に接地させつつ移動する場合、さらには腕部リンクのみにより、天井からの突起物にぶら下がりながら空間を移動する様な場合などにも妥当するものである。

【0054】尚、この発明を2足歩行の脚式移動ロボットを例にとって説明してきたが、それに限られるものではなく、3足以上の脚式移動ロボットにも妥当するものである。

#### 【0055】

【発明の効果】請求項1項にあっては、脚（腕）部リンクで自重を支持、又は移動のための駆動力を発生するリンク式移動ロボットの制御装置において、前記ロボットの姿勢又は姿勢の時系列に関する目標値を設定する目標値設定手段、前記姿勢又は姿勢の時系列に関する姿勢目標値にしたがって前記ロボットのアクチュエータの目標操作量を決定する目標操作量決定手段、及び前記目標操作量となる様にアクチュエータを駆動する駆動手段、のうち、少なくとも1つを備える様に構成すると共に、貨物を積載して運搬する様に構成したので、該リンク式移動ロボットは段差や階段を含む環境や、さらには不整地などの環境でも荷物を運搬することができるようになる。この段差や階段などがあっても移動できるリンク式のロボットによって荷物の搬送を行うことにより、作業環境をロボットのために整備する必要から解放することが達成できる。従って、環境の整備が困難な既存の設備においても容易にロボットの導入が行えるようになる。さらに、該リンク式移動ロボットは室内のみならず、屋外や、さらには不整地などを移動することも可能なので、例えば山小屋へ荷物を運搬する場合など、車両では運搬できない山道などの部分は人間が荷物を背負って運搬していたが、この部分を人間に替わって機械で運搬することができるようになるので、人間を重労働から解放することができる。

【0056】請求項2項にあっては、貨物を積載し、運搬するに際し、該貨物の任意の回転軸まわりの回転角速度が実質的に零または所定の値より小さくなる様に運搬

する如く構成したので、移動（歩行）の安定性を考慮するうえで、荷物のイナーシャが関与する項を無視できる。その結果、演算量の縮小が達成されると共に荷物のイナーシャを測定する必要がなくなる。

【0057】請求項3項にあっては、貨物を積載し、運搬するに際し、該貨物を積載する部位の任意の回転軸まわりの回転運動に関係する前記目標値を、該部位の任意の回転軸まわりの回転角速度が実質的に零または所定の値より小さくなる様に設定する如く構成したので、直接に荷物の回転を考慮することなく、より簡単に演算量の縮小を達成できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に係る脚式移動ロボットの歩行制御装置を全体的に示す概略図である。

【図2】図1に示す制御ユニットの説明ブロック図である。

【図3】本制御装置の関節駆動制御で使用する歩行パターン（目標軌道）の設定作業を示すフロー・チャートである。

【図4】図3フロー・チャートで使用する12個のパラメータを示す説明図である。

【図5】図1のロボットに作用する路面反力を示す説明図である。

【図6】図1のロボットについて角運動量の法則を適用する場合の説明図である。

【図7】この制御における離床の瞬間のzmpの位置を示す説明図である。

【図8】この制御における着地の瞬間のzmpの位置を示す説明図である。

【図9】この制御におけるzmp軌跡を歩行中に上方から見た説明図である。

【図10】1歩行周期における重心の重力方向の位置、その変位速度、その変位加速度の変化を示す波形図である。

【図11】図1に示すロボット1に作用する外力による負荷（関節保持トルク）を示す説明図である。

【図12】図3フロー・チャートのGz軌道の最適化作業を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

【図13】図1に示すロボット1の膝関節が比較的大きく曲がった状態を示す説明図である。

【図14】図1に示すロボット1の膝関節が比較的大きく伸びた状態を示す説明図である。

【図15】図13と図14における重心の重力方向の変位と膝関節曲げ角度との関係を示す説明図である。

【図16】図3フロー・チャートの遊脚軌道の最適化作業を示す説明図である。

【図17】左半分に歩容パラメータである遊脚足平のy軸まわりの回転角度（ $\theta_y$ ）の、右半分に歩容パラメータから計算された足関節角度の歩行の1周期における角度、角速度、角加速度の変化を示す波形図である。

【図18】歩容パラメータから計算された歩行の1周期における膝関節の角度、角速度、角加速度の変化を示す波形図である。

【図19】遊脚軌道の最適化の様子を表す、図1に示すロボットを側面から見た説明図である。

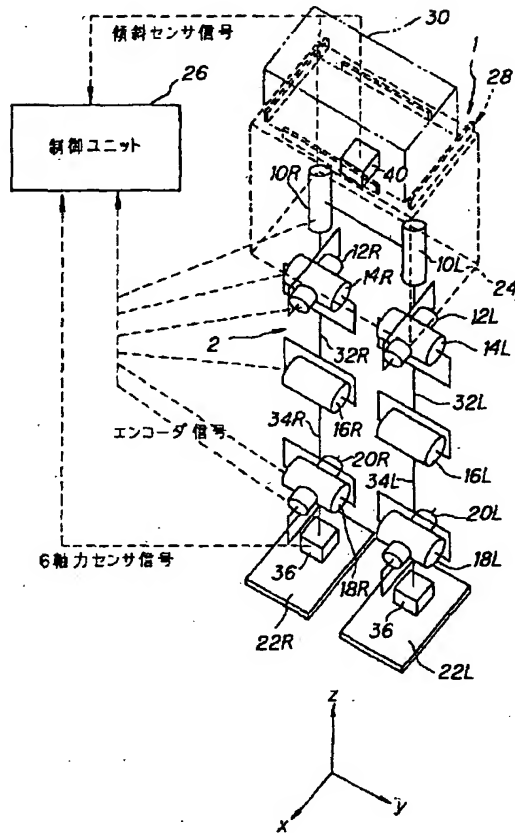
【図20】図2の制御ユニットが行う関節駆動制御を示すフロー・チャートである。

【符号の説明】

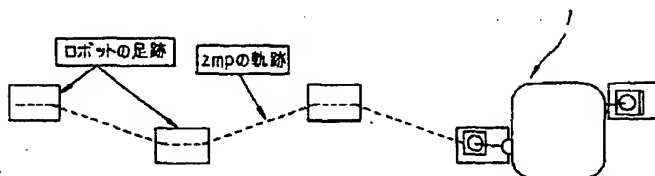
- 1 脚式移動ロボット（2足歩行ロボット）  
 2 脚部リンク  
 10R, 10L 脚部回旋用の関節

- 12R, 12L 股部のロール方向の関節  
 14R, 14L 股部のピッチ方向の関節  
 16R, 16L 膝部のピッチ方向の関節  
 18R, 18L 足首部のピッチ方向の関節  
 20R, 20L 足首部のロール方向の関節  
 22R, 22L 足平（足部）  
 24 筐体  
 26 制御ユニット  
 28 ルーフキャリア  
 30 貨物  
 36 6軸力センサ

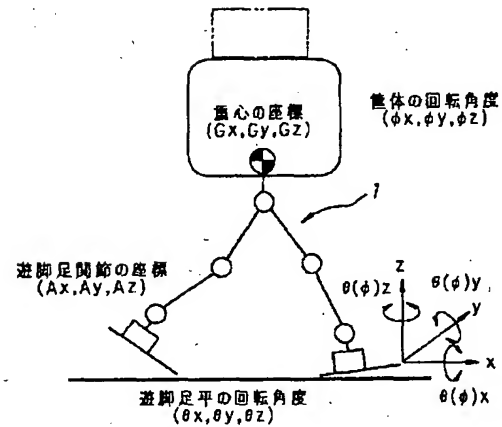
【図1】



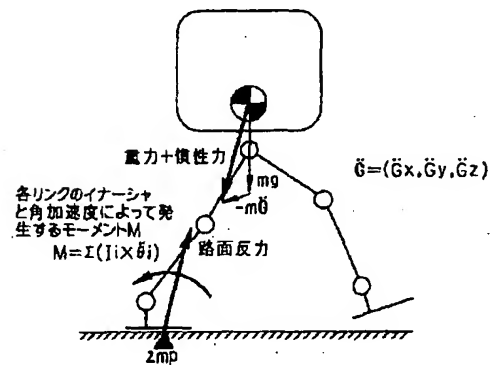
【図9】



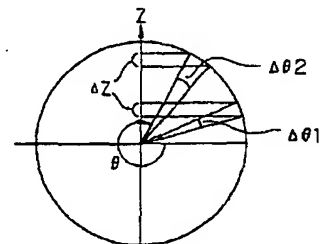
【図4】



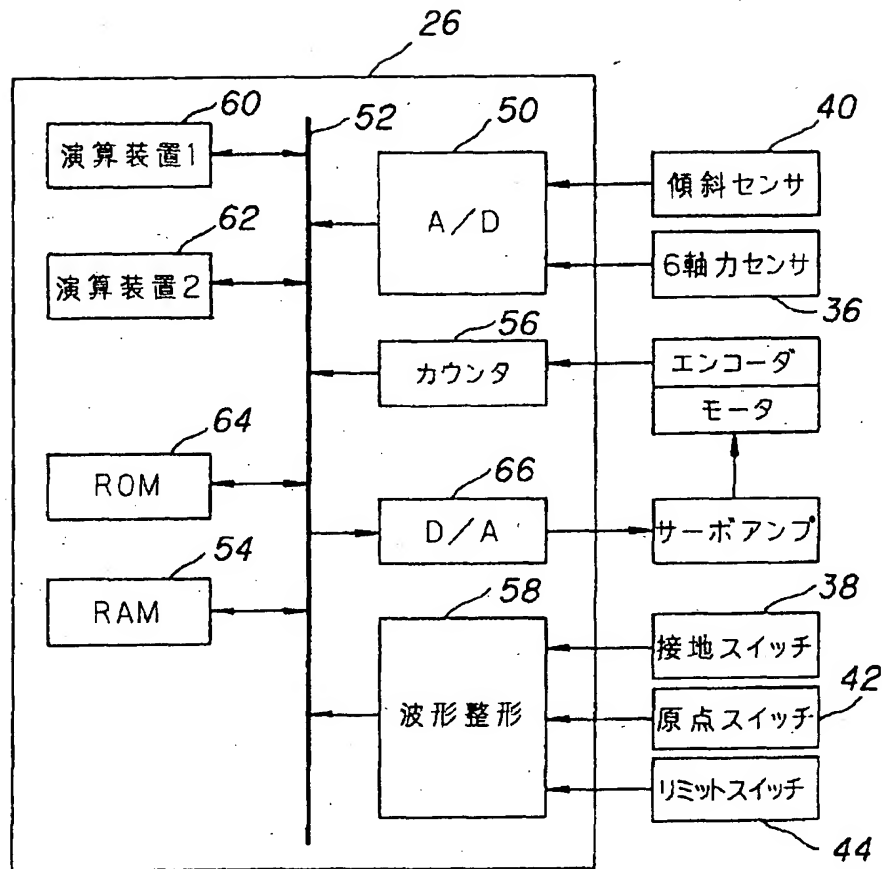
【図5】



【図15】

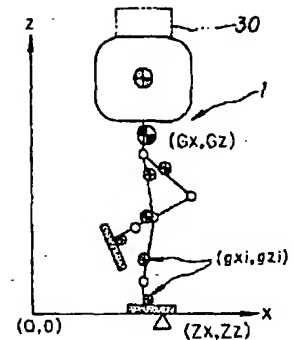


【図2】



制御ユニット

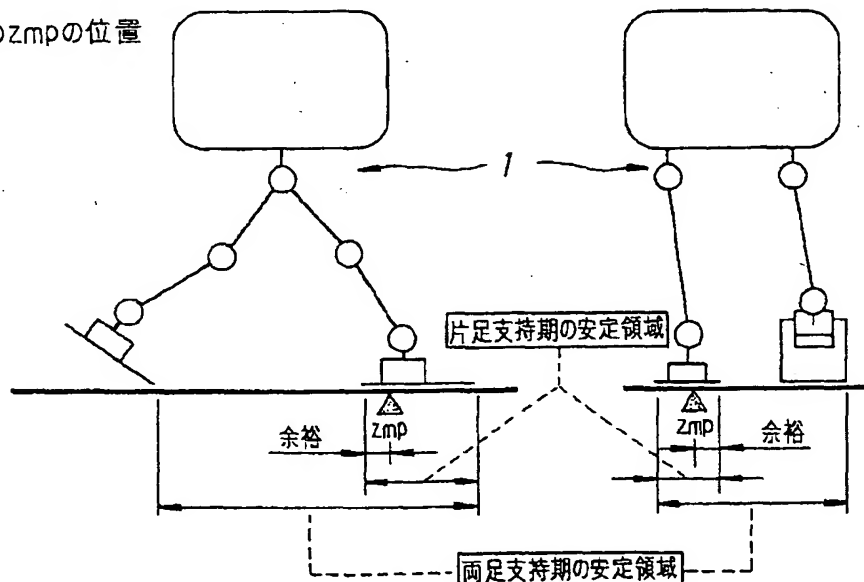
【図6】



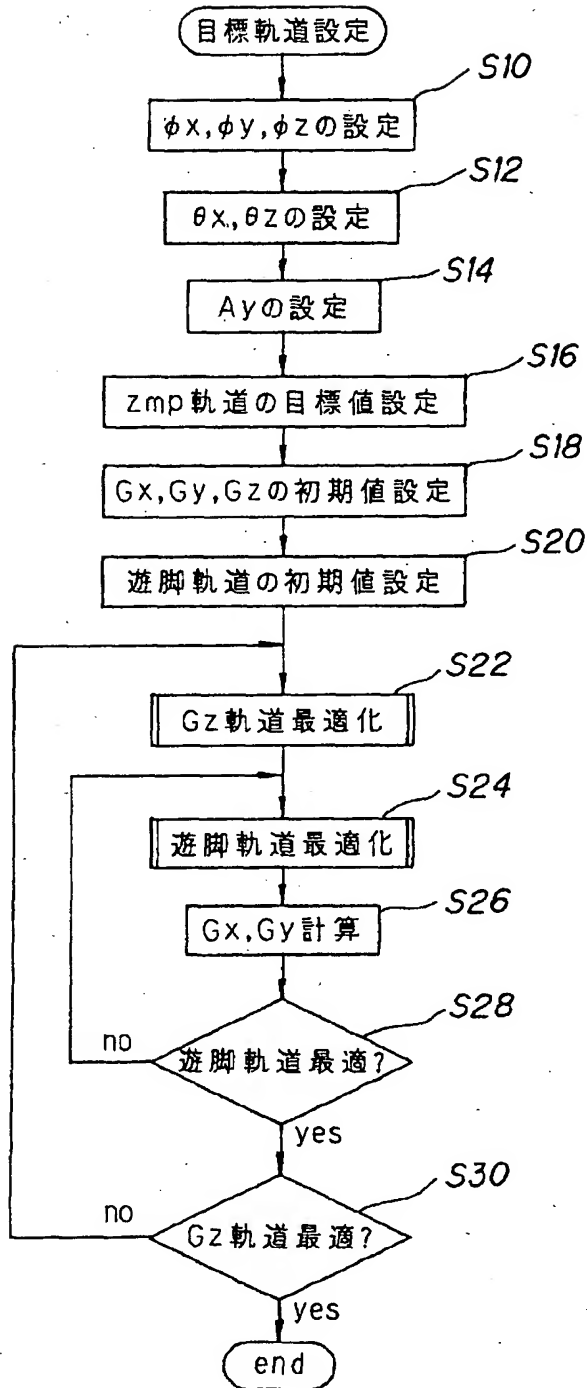
- $M$ : ロボット全体の質量  
 $Gx$ : ロボット全体の重心のX座標  
 $Gz$ : ロボット全体の重心のZ座標  
 $m$ : 各リンクの質量  
 $gxi$ : 各リンクの重心のX座標  
 $gzi$ : 各リンクの重心のZ座標  
 $Ii$ : 各リンクの慣性モーメント  
 $\omega i$ : 各リンクの角速度  
 $Zx$ : ZmpのX座標  
 $Zz$ : ZmpのZ座標  
 $g$ : 重力加速度

【図7】

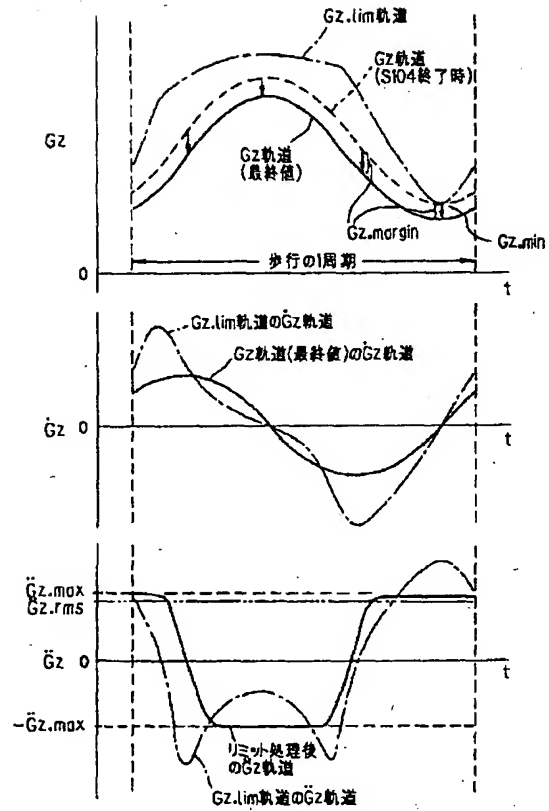
離床の瞬間のZmpの位置



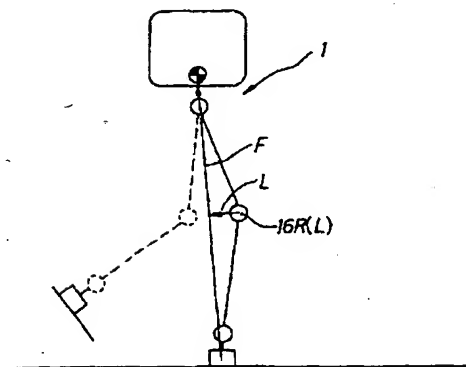
【図3】



【図10】

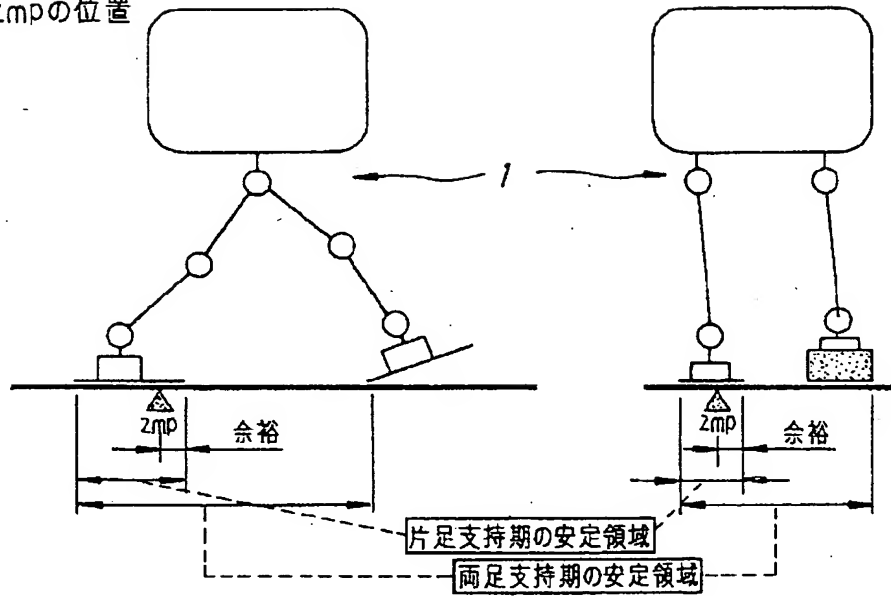


【図11】

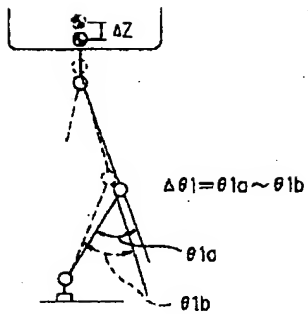


【図8】

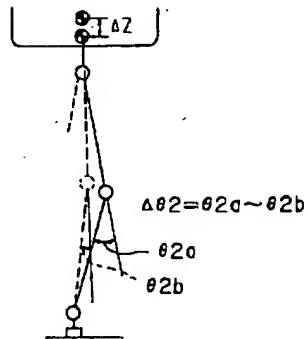
着地の瞬間のZmpの位置



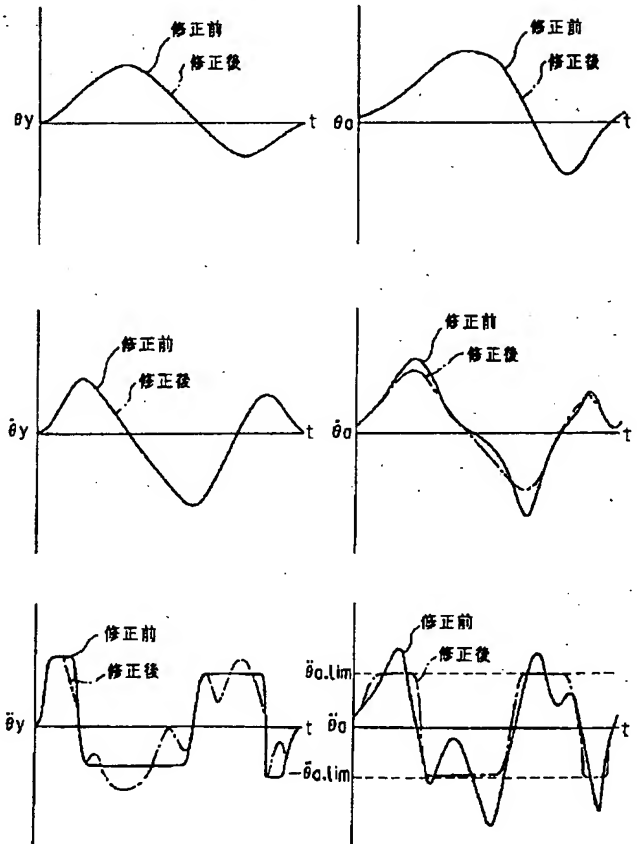
【図13】



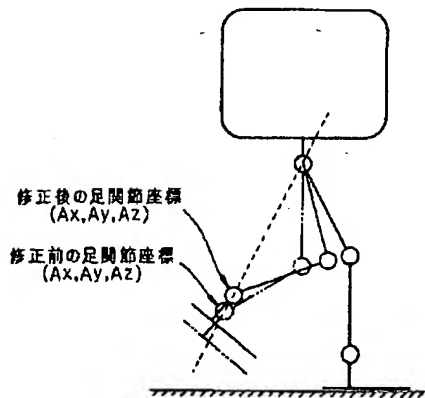
【図14】



【図17】

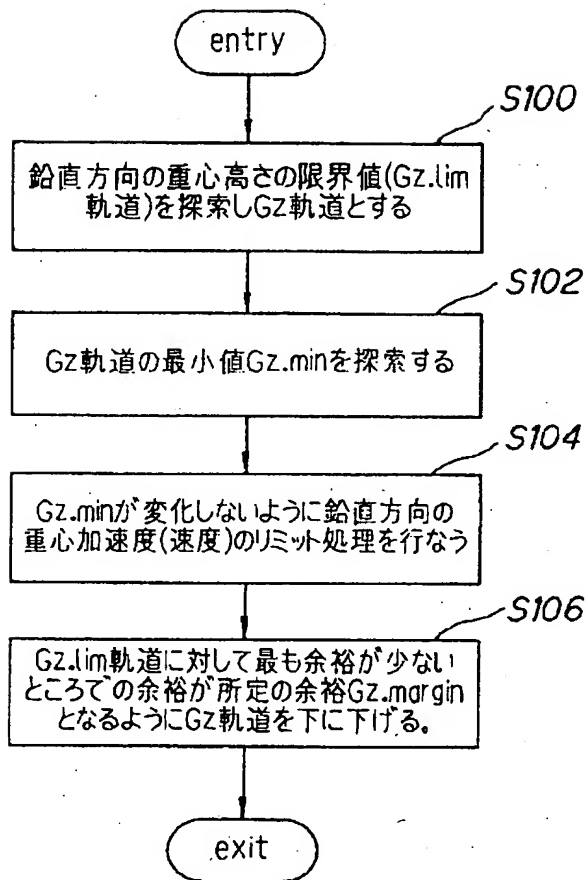


【図19】

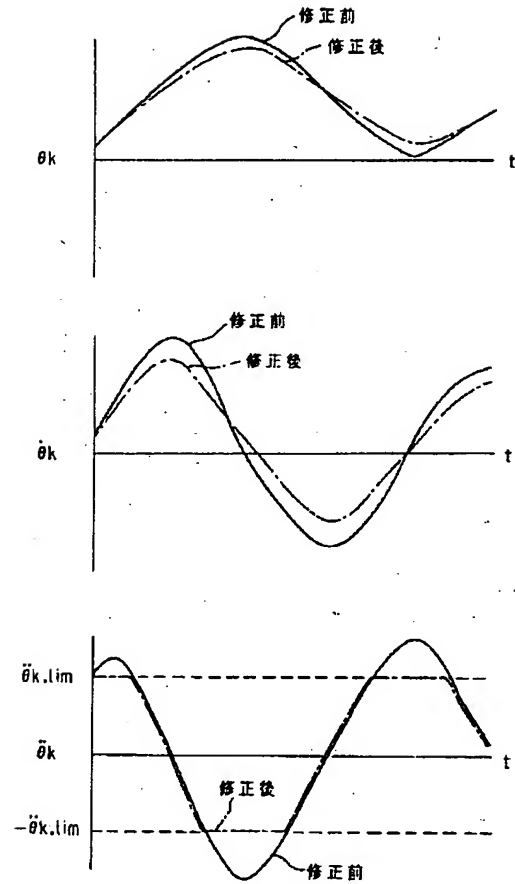




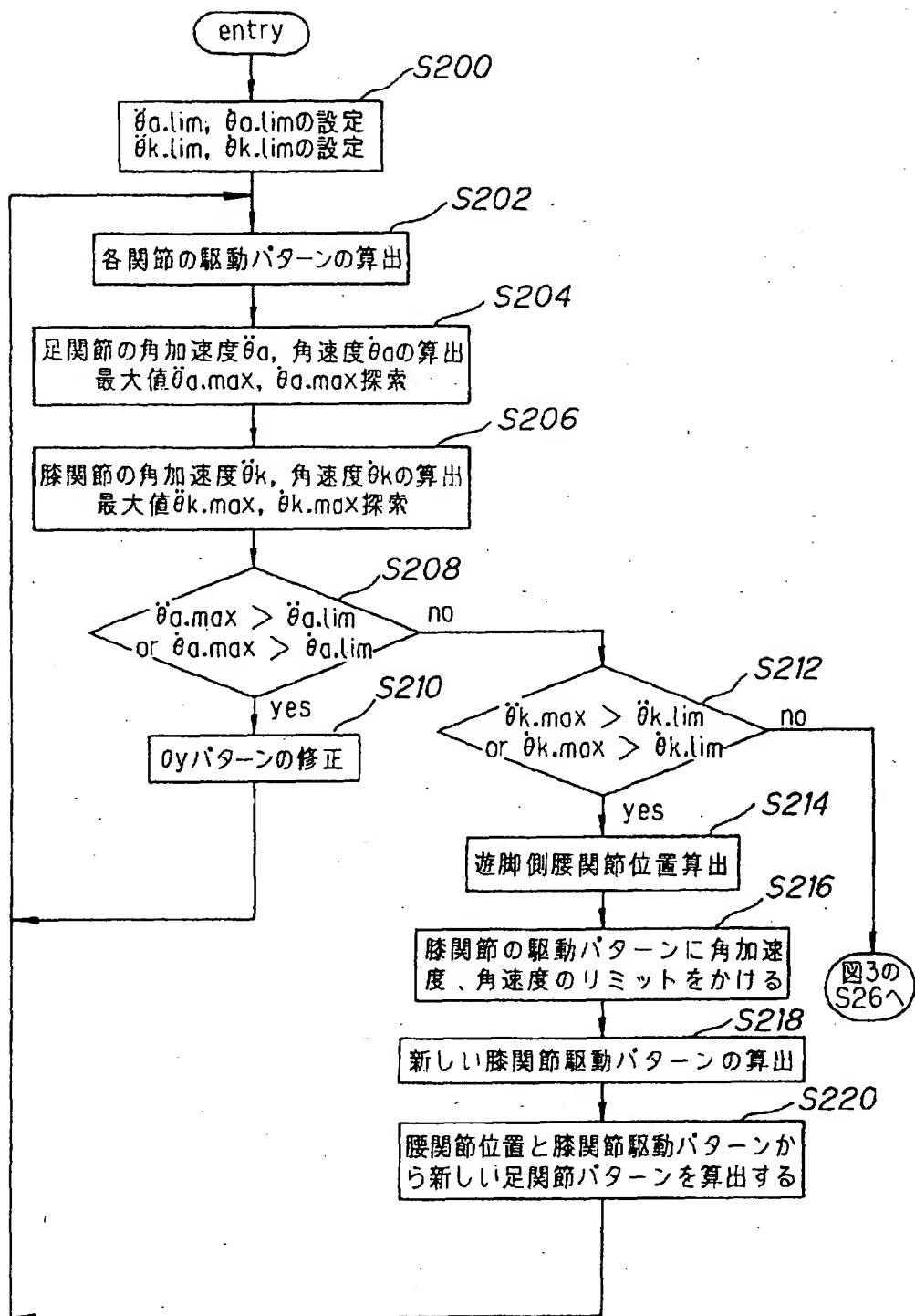
【図12】



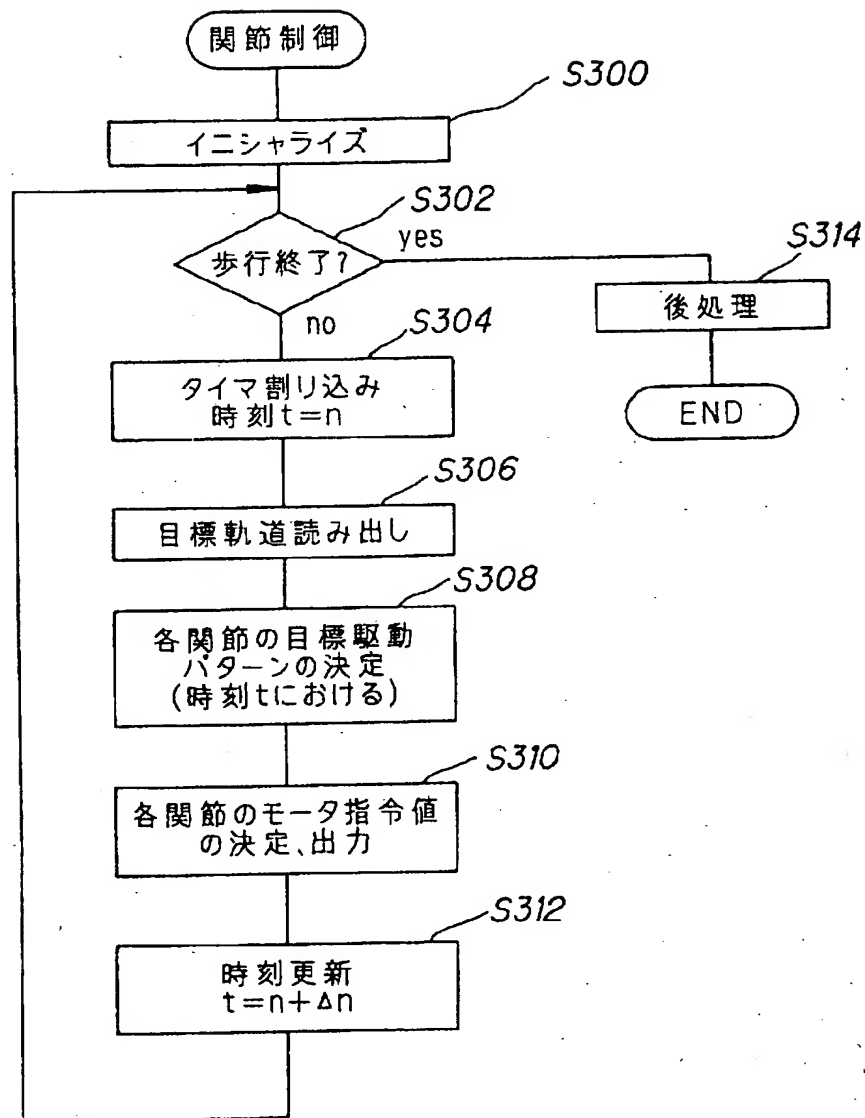
【図18】



【図16】



【図20】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 5

G 0 5 D 1/02

1/08

識別記号

庁内整理番号

F I

Z 9323-3H

Z 9323-3H

技術表示箇所